

文章编号:1001-5078(2016)10-1238-06

· 激光器技术 ·

端面抽运 DPAL 三维模型及激光输出特性的模拟研究

赵晓红¹, 李听听¹, 王世红¹, 刘万发², 谭彦楠²

(1. 北京邮电大学理学院, 北京 100876; 2. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要:根据激光三能级速率方程理论,考虑抽运光聚焦的空间分布,建立三维 DPAL 速率方程组的理论模型,结合激光系统运行的边界条件,通过数值方法,对模型进行求解,对端面抽运铷蒸汽激光器的输出特性进行了详细分析,包括抽运光聚焦光斑半径、聚焦位置、蒸气池长度等参量对模式匹配效率、阈值抽运功率和斜率效率的影响。在模式匹配最佳时,计算了对介质长度对激光输出和阈值的影响。根据抽运光功率,以获得最大激光输出功率为目标,给出了激光器系统的优化参数,包括介质长度、抽运光聚焦在介质中的聚焦位置、输出耦合反射率。

关键词:3D 模型;模式匹配;半导体抽运碱金属蒸汽激光器;激光速率方程

中图分类号:TN241 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.014

3D model of end pumped DPAL and simulation study of its output characteristics

ZHAO Xiao-hong¹, LI Ting-ting¹, WANG Shi-hong¹, LIU Wan-fa², TAN Yan-nan²

(1. Science School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

Abstract: According to the laser three-level rate equation theory and spatial distribution of pump diode focusing, theoretical model of three-dimensional DPAL rate equations is established. The model was solved by numerical method with the boundary conditions of the laser system. The output characteristics of end pumped rubidium vapor laser were analyzed in detail. Meanwhile, the influence of some parameters on efficiency of mode matching, threshold pump power and the slope efficiency were analyzed, including focusing spot radius of pumping light, focusing position and gain cell length, etc. The influence of the medium length on the laser output and the threshold value was calculated at the best mode matching. In order to obtain the maximum laser output power, the optimization parameters of the laser system were given, including the medium length, the focusing position of the pump and the output coupling reflectivity.

Key words: 3D model; mode match; diode pumped alkali vapor laser; laser rate equation

1 引言

美国 Lawrence Livermore 国家实验室在 2003 年利用掺钛蓝宝石激光作抽运源实现光抽运碱金属铷蒸汽激光器^[1]并提出半导体激光抽运碱金属蒸汽激光器(DPAL)的理论模型^[2],在 2005 年真正实现半导体激光抽运铷蒸汽激光器^[3]。DAPL 具有极高

的量子效率(K 99.5%, Rb 98.1%, Cs 95.2%)、热效应小、光束输出质量好等优点,作为抽运源的半导体激光器具有效率高、体积小等优点,通过带宽压窄和稳频技术可以满足 DPAL 对于抽运源窄线宽、高波长稳定性的要求,因此高功率 DPAL 的理论和实验研究被工业、医疗、军事等领域所关注。2008 年

基金项目:中国科学院化学激光重点实验室开放课题基金资助。

作者简介:赵晓红(1964-),女,博士,教授,主要从事激光物理及非线性光学方面的研究。E-mail:x_zhao@bupt.edu.cn

收稿日期:2016-01-22

美国空军学院获得了峰值功率 48W 的铯激光和 17W 连续输出的铷激光^[4-5]。2012 年 Bogachev 报导了光光转换效率约为 48% 的 1 kW 连续输出激光器^[6],为目前有报道的输出功率最高的半导体抽运碱金属蒸汽激光器。国内的国防科技大学在 2011 年实现了国内的首次出光实验^[7],随后 2012 年中国科学院电子学研究所也实验成功实现 2.8W 铷激光输出^[8]。

在理论方面的研究,主要是对 DPAL 动力学过程进行建模和仿真研究, Lawrence Livermore 国家实验室 R. J. Beach 于 2004 年建立了纵向抽运 DPAL 理论模型^[2],描述了 DPAL 的基本动力学过程,考虑宽带抽运效应和精细结构的弛豫过程,获得了与实验相符的结果。2010 年,美国空军研究院 G. D. Hager 提出了基于窄带光源抽运光条件下的动力学模型^[9],通过介质内平均抽运光强的方法理论计算了激光输出光强,再通过模式匹配参数计算激光输出功率及转换效率,在此基础上进一步分析了宽带抽运下激光输出特性^[10]。国内的国防科技大学、浙江大学、中国科学院等也报道了有关理论方面的研究^[11-17],黄伟、徐艳等建立了考虑抽运光强与振荡光强空间分布的 DPAL 速率方程模型^[16-17],获得了铷和铯 DPAL 的阈值特性。

为使碱金属蒸汽最大限度地吸收抽运光的能量,本文在以往建模和仿真研究的基础上^[18-20],考虑介质中激光和抽运光传输过程的空间分布,通过数值方法,对宽带抽运下三维 DPAL 三能级速率方程模型进行求解,研究了在不同模式匹配下端面抽运铷蒸汽激光器的输出特性,包括抽运光聚焦光斑半径、发散角、聚焦位置、蒸气池长度等对输出功率和阈值功率的影响。

2 三维 DPAL 速率方程模型

DPAL 激光三能级系统如图 1 所示,碱金属铷原子的能级中, $5^2S_{1/2}$ 为基态能级,自旋轨道裂变成亚稳态能级 $5^2P_{1/2}$ 和激发态能级 $5^2P_{3/2}$, $5^2S_{1/2}$ 到 $5^2P_{3/2}$ 的跃迁称为抽运跃迁(铷原子 780 nm 的 D2 线),处于激发态能级 $5^2P_{3/2}$ 的电子通过自旋轨道相互作用弛豫到亚稳态 $5^2P_{1/2}$ 能级, $5^2P_{1/2}$ 到 $5^2S_{1/2}$ 的跃迁称为激光跃迁(铷原子 795 nm 的 D1 线)。

以往有关 DPAL 模拟计算文献中,通过介质内平均抽运光强和激光光强近似解析计算激光输出光强,再通过抽运光注入参数和模式匹配参数计算激光输出功率^[9],模式匹配参数的计算有近似计算和光强加权交叠积分的计算,对于高功率 DPAL,需要

较长的介质实现激光的增益,抽运光的空间分布应加以考虑,因此以上近似计算具有一定局限性。

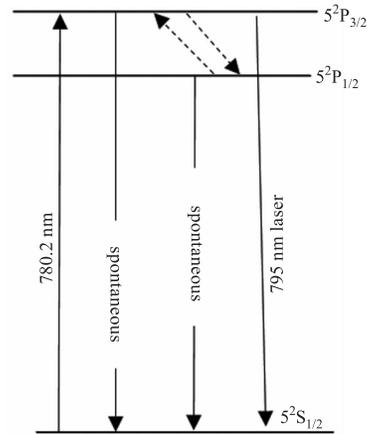


图 1 与激光跃迁有关的碱金属铷原子能级图

Fig. 1 Energy levels of Rb relevant to a laser demonstration

图 2 为纵向抽运 DPAL 结构和激光谐振腔内不同传播方向的抽运光和激光光强示意图,增益介质长度为 L , I_p^+ 和 I_l^+ 分别为两个方向上的抽运光光强和激光光强,入射抽运光中心光强为 I_p^m , T_p 和 T_l 分别为增益池窗口对抽运光和激光的透过率, T_s 为其他光学损耗, R_{oc} 和 R_p 分别为输出耦合镜和高反射镜的反射率, I_{out} 为输出谐振腔的激光的中心光强。

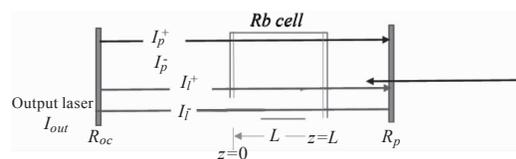


图 2 激光谐振腔内不同传播方向的抽运光和激光光强示意图

Fig. 2 Longitudinal pumping DPAL structure and schematic diagram of the pump intensity and laser intensity in propagation directions within the laser resonator

基于三能级激光系统的速率方程理论,考虑介质中激光和抽运光传输过程光强的空间分布,同时考虑通过介质的抽运光经高反射镜后仍被介质吸收,建立碱金属激光器速率方程:

$$\begin{aligned} \frac{dn_1(x,y,z)}{dt} &= - [n_1(x,y,z) - \frac{1}{2}n_3(x,y,z)] \times \\ &\int_0^\infty \frac{\sigma_{13}(v) \times I_p(x,y,z,v)}{hv_p} dv + \sigma_{21} \times [n_2(x,y,z)] - \\ &n_1(x,y,z) \left[\frac{I_l^+(x,y,z) + I_l^-(x,y,z)}{hv_l} + \frac{n_2(x,y,z)}{\tau_{21}} + \right. \\ &\left. \frac{n_3(x,y,z)}{\tau_{31}} \right] \\ \frac{dn_2(x,y,z)}{dt} &= - \sigma_{21} \times [n_2(x,y,z) - n_1(x,y, \end{aligned} \tag{1}$$

$$z) \left] \frac{I_l^+(x, y, z) + I_l^-(x, y, z)}{h\nu_l} + \gamma_{\text{mix}} [n_3(x, y, z) - 2\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) n_2(x, y, z)] - \frac{n_2(x, y, z)}{\tau_{21}} \quad (2)$$

$$\frac{dn_3(x, y, z)}{dt} = [n_1(x, y, z) - \frac{1}{2}n_3(x, y, z)] \times \int_0^\infty \frac{\sigma_{13}(v) \times I_p(x, y, z, v)}{h\nu_p} dv - \gamma_{\text{mix}} [n_3(x, y, z) - 2\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) n_2(x, y, z)] - \frac{n_3(x, y, z)}{\tau_{31}} \quad (3)$$

式中, $n_1(x, y, z)$, $n_2(x, y, z)$, $n_3(x, y, z)$ 分别是增益介质中对应位置 (x, y, z) 处 $^2S_{1/2}$, $^2P_{1/2}$, $^2P_{3/2}$ 上碱金属原子数密度; ν_p, ν_l 分别是抽运光和激光频率; τ_{31} , τ_{21} 分别 $^2P_{3/2}$, $^2P_{1/2}$ 的能级寿命; σ_{21} 为 $^2P_{1/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$ 跃迁中心频率处的发射截面; $\sigma_{13}(v)$ 为对应频率为 v 处的缓冲气体碰撞加宽后 $^2P_{1/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$ 跃迁原子吸收截面; ΔE 为 $^2P_{3/2}$ 和 $^2P_{1/2}$ 能级之间的能量差; γ_{mix} 为 $^2P_{3/2}$ 和 $^2P_{1/2}$ 能级之间的精细能级混合速率; h 为普朗克常量, k_B 为玻尔兹曼常量; T 为铷蒸汽温度; $I_p(x, y, z, v)$ 为增益介质对应位置 (x, y, z) 处某一频率 v 处的抽运光强; $I_l^+(x, y, z)$ 和 $I_l^-(x, y, z)$ 分别为介质对应位置 (x, y, z) 处向前传播和向后传播的激光光强。方程(1), (2), (3) 并不相互独立, 三者之间满足粒子数守恒方程:

$$n_1(x, y, z) + n_2(x, y, z) + n_3(x, y, z) = n_{\text{Rb}} \quad (4)$$

n_{Rb} 为介质中的铷蒸汽的粒子数密度, 由工作温度下的饱和蒸汽压决定。抽运光和激光的光强在横截面上为高斯分布, 沿轴向的抽运光和激光的方程为:

$$\frac{dI_p^\pm(0, 0, z, \lambda)}{dz} = \mp [n_1(0, 0, z) - \frac{1}{2}n_3(0, 0, z)] \sigma_{13}(\lambda) I_p^\pm(0, 0, z, \lambda) \quad (5)$$

$$\frac{dI_l^\pm(0, 0, z)}{dz} = \pm [n_2(0, 0, z) - n_1(0, 0, z)] \sigma_{13} I_l^\pm(0, 0, z) \quad (6)$$

考虑空间的边界条件:

$$I_l^+(0, 0, 0) = I_l^-(0, 0, 0) T_l^2 R_{oc} \quad (7)$$

$$I_l^-(0, 0, l) = I_l^+(0, 0, l) T_l^2 T_s^2 R_p \quad (8)$$

$$I_p^-(0, 0, l, \lambda) = I_p^+(0, 0, l, \lambda) T_p^2 T_s^2 R_p \quad (9)$$

在给定初始入射抽运光光强的条件下, 对上述模型用龙格库塔法进行数值求解。

3 计算结果

激光和抽运光光束半径及光强在介质中的分布

如图3, 抽运光腰半径为 0.05 cm, 发散角(半角)为 0.03 rad, 激光光束的腰半径和发散角由激光谐振腔的参数决定, 图3所示激光腰半径为 0.06 cm, 激光的发散角与作为抽运光的半导体激光相比很小, 因此数值计算中不考虑介质中激光光束半径的变化, 激光和抽运光在传播方向横截面上光强为高斯分布, 其光斑半径内的能量为全部能量的 86.4%。激光谐振腔输出耦合镜反射率 $R_{oc} = 0.2$, 高反射镜的反射率 $R_p = 1.0$, 增益池窗口透过率 $T_p = T_s = 0.965$ 。增益池温度 $T = 140$ °C, 缓冲气体为 600 Torr 甲烷, 抽运光中心波长 780.2 nm, 带宽 0.15 nm, 抽运源半导体激光功率为 30.2 W, DPAL 铷激光器输出波长为 795 nm。

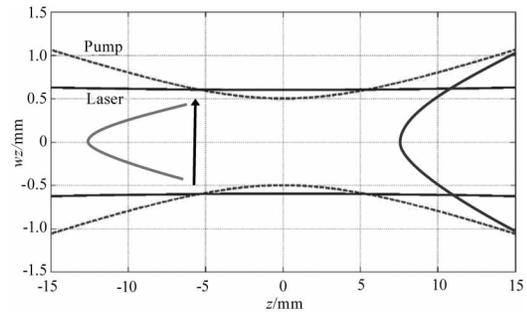


图3 介质中抽运光和激光光斑半径及光强分布示意图
Fig.3 Schematic diagram of distribution of pump and laser spot radius and the intensity in the cell

3.1 抽运光和激光光强在介质中的变化

通过数值计算求解速率方程组式(1) - (6), 得出一定抽运功率下激光的输出功率及介质内抽运光和激光光子数的空间分布, 图4为抽运光和激光功率随传播方向 $(+z, -z)$ 变化图。在介质内, 抽运光被激活粒子吸收, 沿传播方向功率逐渐减小, 在上述运转状态下, 由于抽运光往返传播后未被完全吸收, $z = 0$ 处介质内抽运光功率略高于抽运源功率 30.2 W, 激光沿 $+z$ 传播方向 Laser + 由左向右、 $-z$ 传播方向 Laser - 由右向左功率增加, 激光由 $z = 0$ 处 $-z$ 方向经谐振腔输出镜输出, $-z$ 方向腔内激光功率为 24.5 W, 耦合输出镜透过率为 0.8, 输出激光功率为 19.6 W。

3.2 激光光束半径对输出功率的影响

抽运光聚焦在长度为 2 cm 的介质中心时, 计算了激光腰半径从 0.03 ~ 0.08 cm 时激光的输出光强, 如图5, 从图中可以看出, 随着激光腰半径增加, 激光功率也随之增大, 并且在激光腰半径等于 0.08 cm 时达到最大。当激光半径小于 0.08 cm 时, 模式匹配效率达不到最佳, 有一部分抽运光不能被充分

利用以转化成激光输出,随着激光腰半径的增大,模式匹配率逐渐增大,并在半径等于端面抽运光半径是达到最大,这时的激光输出也达到最佳,当激光半径继续增加时,由于光强加权模式匹配率减小,激光功率开始减小。

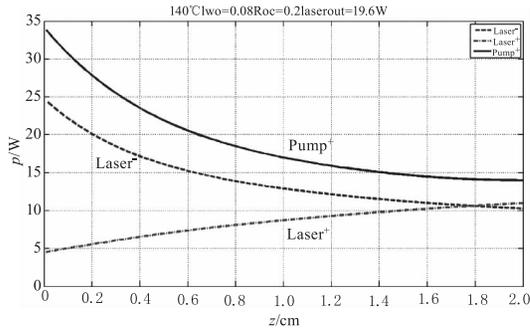


图4 抽运光和激光光功率在介质中纵向分布图

Fig. 4 The longitudinal power distribution of pump and laser in the cell

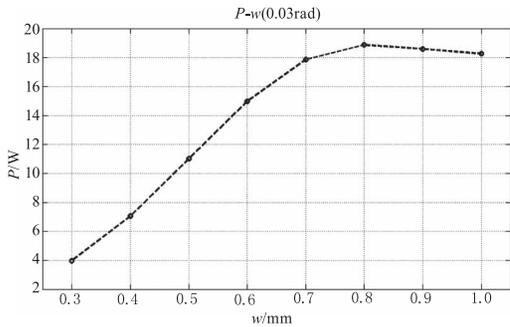


图5 激光输出功率与激光腰半径的关系

Fig. 5 The laser output power varies with the laser waist radius

3.3 抽运光聚焦位置对激光性能的影响

图6为抽运光聚焦在增益池不同位置时激光的输出功率和阈值抽运功率,激光光斑半径0.08 cm,增益池长度为2 cm,在抽运光聚焦到增益介质中心时,激光的输出最强,阈值抽运功率最小,此时抽运光与激光在增益介质中具有最大的空间重叠度,可以获得最强的激光输出,随着光腰位置偏离增益池中心,激光的输出光强逐渐减小,阈值功率增加。

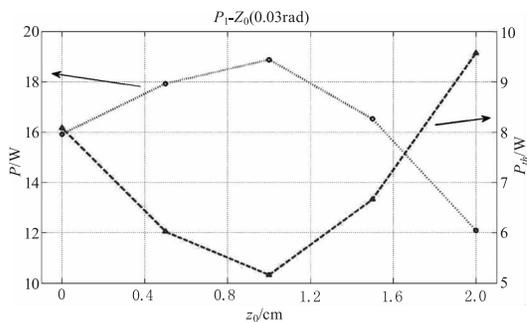


图6 抽运光腰半径位置对激光输出和阈值抽运功率的影响
Fig. 6 Effect of laser beam waist radius position on laser output and threshold pumping power

3.4 增益介质长度对激光输出性能的影响

3.4.1 增益介质长度对抽运光阈值功率的影响

图7为抽运光阈值功率(光强)随介质长度的变化,可以看出,抽运光的阈值功率随介质长度增大呈现增大的趋势。当介质较长时,需要被激活的碱金属原子增多,阈值抽运功率增大,在低抽运功率下为实现激光输出增益介质不宜过长。如果增益介质过短,碱金属蒸汽对抽运光的吸收率会明显降低,也将导致阈值功率的增大。对高功率抽运源,较短的增益介质不能充分吸收抽运光,从而影响高功率的激光输出。

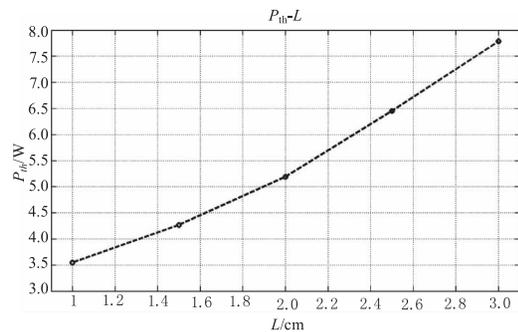


图7 抽运光阈值功率随介质长度的变化

Fig. 7 The variation of the pumping light threshold power with the length of the cell

3.4.2 增益介质长度对输出功率的影响

图8是激光输出功率随介质长度的关系,激光腰半径为0.08 cm,抽运光腰半径为0.05 cm,对于功率为30.2 W,发散角为0.03 rad的抽运光,从图中可以看出,在介质长度较小时,虽然激光器的阈值较低,有很大一部分抽运光在激光的模式体积以外,在纵向经过一次往返较多没有被吸收抽运光传输到谐振腔外,因此抽运光的利用率不高,很大的部分抽运光不能转换成激光输出,所以导致激光的输出功率较小,随着增益介质长度的增加,抽运光的吸收率会增大,在介质长度小于2.0 cm时,抽运光全部在激光的模式体积内,所以介质长度在2.0 cm附近存在一个最佳值,此时激光的输出功率最大,当介质长度继续增大时,在轴向抽运光虽然被吸收比较完全,但在截面上抽运光溢出激光的模式体积,激光输出功率减小。对于发散角为0.03 rad的抽运光,最佳长度为1.9 cm,对于发散角为0.015 rad、功率为30.2 W和60.4 W的抽运光,最佳长度分别为2.0 cm和3.0 cm,随着抽运光功率的增加,增加增益池长度或提高工作温度使更多的铷原子吸收抽运光,提高激光输出功率。

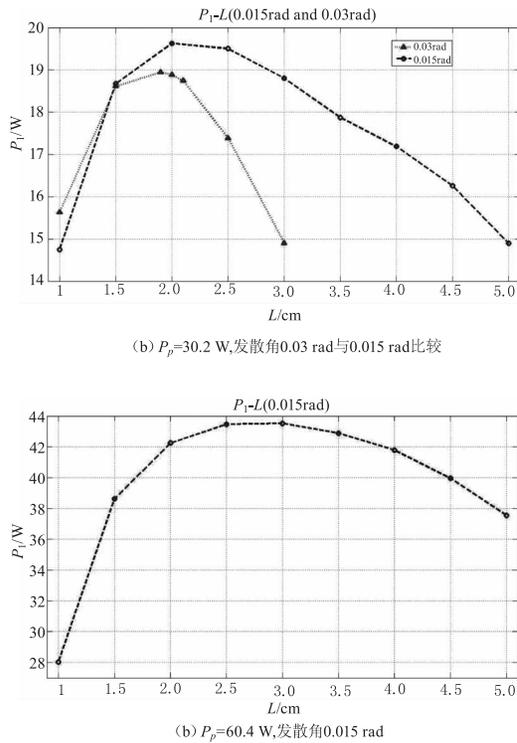


图8 激光输出功率随介质长度的关系

Fig. 8 Laser output power varies with the cell length

4 结论

综合以上模拟结果,对于抽运光功率为 30.2 W,腰半径为 0.05 cm,发散角为 0.03 rad 和 0.015 rad,选择激光腰半径为 0.08 cm,激光谐振腔输出耦合镜反射率 $R_{oc} = 0.2$,增益池温度 $T = 140\text{ }^\circ\text{C}$,长度为 2 cm,并将抽运光聚焦在增益池中心,可获得最佳激光输出功率。对于功率为 60.4 W,发散角为 0.015 rad 的抽运光,获得最佳激光输出功率的长度为 3 cm。

本文建立了 DPAL 三维速率方程模型,结合边界条件,通过数值计算增益介质中双方向激光和抽运光的光强的三维空间分布,模拟了激光系统的运行状态,得到激光和抽运光在增益介质中功率分布和激光输出功率。抽运光功率、腰半径、发散角等参数确定的情况下,通过模拟计算选择增益池长度、抽运光聚焦位置、光学谐振腔的参数可以实现最佳模式匹配率,获得最大的激光输出功率,对于多个 LD 阵列的抽运源,提高聚焦的光束质量,减小发散角、增大焦深有利于提高激光输出功率。

参考文献:

[1] W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, et al. Resonance transition 795nm rubidium laser[J]. Opt. Lett., 2003,

28(23):2336-2338.

- [2] R H Page, R J Beach, V K Kanz, et al. First demonstration of a diode-pumped gas (Alkali Vapor) laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, 2005:467-469.
- [3] Beach R J, Krupke W F, Kanz V K, et al. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling [J]. JOSA B, 2004, 21(12): 2151-2163.
- [4] Zhdanov B V, Sell J, Knize R J. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48W output power [J]. Electronics Lett, 2008, 44(9): 582-583.
- [5] Zhdanov B V, Stooke A, Boyadjian G, et al. Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays [J]. Opt Lett, 2008, 33(5): 414-415.
- [6] Bogachev A V, Garanin S G, Dudov A M, et al. Diode-pumped caesium vapour laser with closed-cycle laser-active medium circulation [J]. Quantum Electronics, 2012, 42(2): 95-98.
- [7] YANG Zining, WANG Hongyan, HUA Weihong, et al. Diode pumped rubidium vapor laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2273-2274. (in Chinese)
- 杨子宁, 王红岩, 华卫红, 等. 半导体泵浦铷蒸气激光器国内首次出光 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2273-2274.
- [8] XU Cheng, TAN Rongqing, LI Zhiyong, et al. 2.8 W linearly polarized output of Rubidium vapor laser with diode pumping [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40: 0102009. (in Chinese)
- 徐程, 谭荣清, 李志永, 等. 半导体抽运铷蒸气输出 2.8 W 线偏振铷激光 [J]. 中国激光, 2013, 40: 0102009.
- [9] Hager G D, Perram G P. A three-level analytic model for alkali metal vapor lasers: part I. Narrowband optical pumping [J]. Appl. Phys. B, 2010, 101: 45-56.
- [10] Gordon D Hager, Glen P Perram. Three-level model for alkali metal vapor lasers. Part II: broadband optical pumping [J]. Appl. Phys. B, 2013, 112: 507-520.
- [11] ZHU Qi, PAN Bailiang, CHEN Li, et al. A kinetic model for optically pumped cesium vapor laser [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3): 1797-1081. (in Chinese)
- 朱琦, 潘佰良, 陈立, 等. 光泵铯激光的动力学模型 [J]. 物理学报, 2010, 59(3): 1797-1081.
- [12] Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, et al. Theoretical model and novel numerical approach of a broadband optically pumped three level alkali vapour laser [J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2011, 44: 085401.

- [13] YU Jianhua, ZHU Qiang, XIE Wu, et al. High-power laser diode-pumped alkali metal vapor laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(7): 46 - 51. (in Chinese)
余建华, 祝强, 谢武, 等. 高功率半导体激光抽运碱金属蒸气激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(7): 46 - 51.
- [14] Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, et al. Modeling, numerical approach, and power scaling of alkali vapor lasers in side-pumped configuration with flowing medium[J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(6): 1353 - 1364.
- [15] Wang Yajuan, Pan Bailiang, Qi Zhu, et al. A kinetic model for diode pumped rubidium vapor laser[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(16): 4045 - 4048.
- [16] HUANG Wei, TAN Rongqing, LI Zhiyong, et al. 3D model and simulative investigation of threshold characteristics of diode pumped Rb vapor laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(1): 011009. (in Chinese)
黄伟, 谭荣清, 李志永, 等. 铷蒸气激光器 3D 理论模型的建立及阈值特性模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(1): 011009.
- [17] XU Yan, CHEN Fei, XIE Jijiang, et al. Analysis on threshold characteristics of a diode-pumped Cs vapor laser[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, 63(17): 174201. (in Chinese)
徐艳, 陈飞, 谢冀江, 等. 半导体抽运铯蒸气激光器阈值特性分析[J]. *物理学报*, 2014, 63(17): 174201.
- [18] ZHAO Xiaohong, SUN Wei, WANG Shihong, et al. Effect of buffer gas and temperature on DPAL output characteristics[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(9): 1054 - 1058. (in Chinese)
赵晓红, 孙伟, 王世红, 等. 缓冲气体及温度对 DPAL 输出性能影响的理论研究[J]. *激光与红外*, 2015, 45(9): 1054 - 1058.
- [19] ZHAO Xiaohong, WANG Shihong, LIU Wanfa, et al. Optimization design of laser diode pumped rubidium vapor laser for high output power[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(s1): s102008. (in Chinese)
赵晓红, 王世红, 刘万发, 等. 高功率半导体激光抽运铷蒸气激光器的优化设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(s1): s102008.
- [20] ZHAO Xiaohong, WANG Shihong, LIU Wanfa, et al. Simulation calculation considering pump spatial distribution of diode pumped alkali vapor laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091405. (in Chinese)
赵晓红, 王世红, 刘万发, 等. 考虑抽运光空间分布的半导体抽运碱金属蒸气激光器的模拟计算[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091405.